

## Review paper

VLIV POŠKOZENÍ POVRCHU  
NA PEVNOST SKLÁŘSKÝCH VÝROBKŮ

VLADIMÍR NOVOTNÝ, MILAN VÍCH

*Státní výzkumný ústav sklářský, Škroupova 957, 501 92 Hradec Králové*

## ÚVOD

Z pevnosti vazeb poutajících vzájemně atomy uvnitř skla bylo odvozeno, že sklo by mělo mít teoreticky pevnost  $1 \times 10^4$  až  $4 \times 10^4$  MPa [1—3]. Sklářské výrobky jsou však  $10 \times$  až  $100 \times$  méně pevné, než je tato teoreticky možná hodnota. Tento rozdíl je vysvětlován působením submikroskopických, popř. až i okem viditelných vad na povrchu skla. V souvislosti s celkově rostoucím rozsahem studia pevnosti skla byla v posledních desetiletích věnována značná pozornost vlivu poškození povrchu sklářských výrobků na jejich pevnost. V tomto článku jsme se pokusili podat přehled nejdůležitějších poznatků v tomto oboru a souhrn výsledků experimentálních měření v SVÚS Hradec Králové.

TEORETICKÁ VYSVĚTLENÍ PŮSOBNÍ  
POVRCHOVÝCH VAD NA PEVNOST

Při tvarování, dalším zpracování, dopravě a používání skleněných výrobků vznikají na jejich povrchu submikroskopické i makroskopické vady. Obvykle mají tvar malých trhlinek a působí jako koncentrátoři napětí. Nejstarší dosud v současné literatuře uváděný výklad vlivu trhlin na zvýšení napětí podal Inglis [1, 4]. Pro povrchovou eliptickou trhlinu v desce (obr. 1) dokázal, že lokální napětí u konce trhliny  $\sigma_m$  nabývá hodnoty

$$\sigma_m = 2 \sigma \left( \frac{a}{r} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

kde  $\sigma$  — napětí, kterým je deska zatěžována,

$a$  — hloubka trhliny,

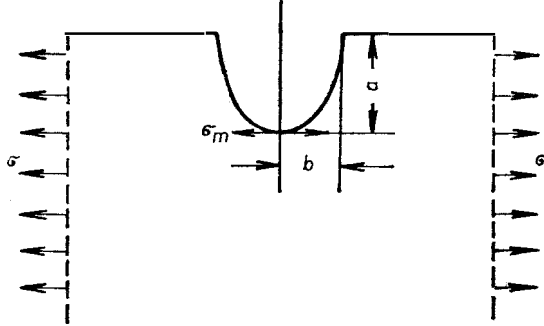
$r = \frac{b^2}{a}$  — radius zakřivení trhliny, kde  $b$  — šířka povrchové trhliny.

Stejný vztah platí i pro trhlinu tvaru úzkého eliptického otvoru (obr. 2), kde  $a$  = délka delší poloosy trhliny,  $b$  = délka menší poloosy.

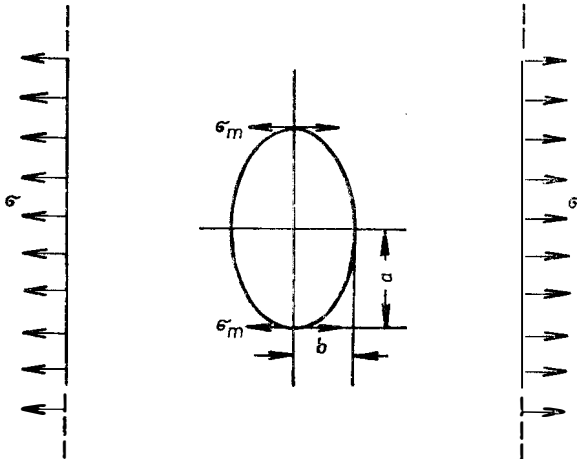
Jak lze vypočítat ze vztahu (1), u konce povrchové trhliny hloubky  $1 \mu\text{m}$  o radiusu  $10 \text{ nm}$  stoupne napětí  $20 \times$  v porovnání s napětím, kterým je zatěžována celá deska. Při namáhání se tak lokální napětí v blízkosti trhlínky zvyšuje na hodnotu blízkou teoretické pevnosti, takže těleso může prasknout, i když celkové zatěžování tělesa je relativně malé.

Další výklad praskání skla, a to z hlediska energetické bilance, podal Griffith [5, 6]: Při šíření trhliny v zatíženém tělese dodávají potřebnou energii vnější

síly nebo se tato energie hradí z energie pružné napjatosti tělesa. Trhлина se bude šířit, když úbytek elastické energie, ke kterému přitom dochází, a práce vykonaná vnějšími silami stačí dodávat energii na vznik nového povrchu skla. Z této podmínky bylo odvozeno kritické napětí  $\sigma_K$  a kritická velikost trhliny  $a_K$ : Trhлина se šíří, a tedy sklo praskne, je-li  $\sigma > \sigma_K$  a obsahuje-li trhlinu rozměru  $a > a_K$ .



Obr. 1. Schematické znázornění povrchové eliptické trhliny;  $a$  — hloubka trhliny,  $b$  — poloviční šířka trhliny,  $\sigma_m$  — napětí u kořene trhliny,  $\sigma$  — napětí, kterým je trhlina zatěžována.



Obr. 2. Schematické znázornění eliptické trhliny ve skleněné desce;  $a$  — délka větší poloosy,  $b$  — délka menší poloosy,  $\sigma_m$  — napětí u kořene trhliny,  $\sigma$  — napětí, kterým je trhlina zatěžována.

Pro ostrou trhlinu, namáhanou rovinným napětím, odvodil Griffith vztah pro kritické napětí  $\sigma_K$ , po jehož překročení začne praskat sklo obsahující trhlinu rozměru  $a$ :

$$\sigma_K = \left( \frac{2E\gamma}{\pi a} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

kde  $E$  — Youngův modul pružnosti,  
 $\gamma$  — povrchová energie,  
 $a$  — rozměr trhliny.

Poněvadž mechanismus praskání je složitější než pouhé přetržení vazeb a dochází k větší spotřebě energie, než by bylo třeba jen na vytvoření nově vznikajícího povrchu, povrchová energie ve vztahu (2) byla později nahrazena efektivní lomovou energií  $\gamma_{ef}$ , která je potřebná k vytvoření jednotky plochy nového povrchu lomem. Byl tak vytvořen obecnější vztah

$$\sigma_K = \left( \frac{\gamma_{ef} E}{\pi a} \right)^{0.5} \quad (3)$$

Efektivní lomová energie  $\gamma_{ef}$  bývá někdy nazývána též energie povrchu vzniklého lomem (fracture surface energy) a označována pouze  $\gamma$  (např. [1]).

Ze vztahu (3) lze odvodit dosazením hodnot pro běžná sodnovápenatokrěmičitá skla ( $E \doteq 1 \times 10^5$  MPa,  $\gamma_{ef} \doteq 6$  J m<sup>-2</sup>), že při pevnosti 100 MPa, dosahované např. u plochých tabulových skel, je kritická délka trhlin  $a_K \doteq 20$   $\mu$ m.

Radius  $r$  zakřivení trhlin je v křehkých materiálech, jako je sklo, řádu meziatomových vzdáleností [7]. Při splnění Griffithova kritéria, tedy namáhání napětím  $\sigma > \sigma_K$ , bude proto podle vztahu (1) zvýšení napětí u trhlinky tak velké, že lokální napětí u konce trhlinky překročí teoretickou pevnost a sklo praskne. Splnění Griffithova kritéria je tak nejen nezbytnou, ale i postačující podmínkou šíření mikrotrhlin a prasknutí skla [8, 1].

Podle tvůrce této klasické a všeobecně uznávané teorie o pevnosti skla se mikro-vady snižující pevnost nazývají Griffithovy trhlinky. Původně se předpokládalo, že jsou rozmístěny v celé hmotě skla, později bylo dokázáno [3, 48, 49], že jsou jenom na povrchu a vznikají jeho mechanickým poškozením, kontaminací nebo odsakelním. Vady přítomné uvnitř dobře utaveného skla (bez nehomogenit, jako kamínky, bublinky a šliry) by musely být rozměru 1 až 10  $\mu$ m [3, 9, 10], aby byly v souladu s experimentálními výsledky. Mohly by být vytvářeny mikroheterogenitou struktury nebo mikronehomogenitami.

Na Griffithovu teorii pevnosti navázala lomová mechanika, jejíž předností je, že popisuje šíření trhliny v reálných konečných tělesech s reálným zatížením. Zvýšení napětí v okolí trhliny vyjadřuje lomová mechanika pomocí součinitele intenzity napětí (stress intensity factor)  $K_N$ , který je definován vztahem

$$K_N = \sigma Y a^{0.5}, \quad (4)$$

kde  $\sigma$  — napětí, kterým je trhlina zatěžována,

$a$  — rozměr trhliny,

$Y$  — součinitel vyjadřující vliv tvaru trhliny, jejího umístění v tělese a tvaru tělesa.

Pro trhlinu ve středu tenké nekonečné desky, zatížené tahovým napětím kolmým k rovině trhliny, je  $Y = \pi^{0.5}$ . Index  $N$  nabývá hodnot I, II a III a charakterizuje způsob namáhání trhliny. Součinitel intenzity napětí pro namáhání tahem, které je z hlediska pevnosti nejzávažnější, se označuje  $K_I$ .

Ze vztahu (2) až (4) je zřejmé, že stejné hodnoty součinitele intenzity napětí lze dosáhnout různými kombinacemi zatěžujícího napětí  $\sigma$  a rozměru trhliny  $a$ . Zmenší-li se hloubka trhliny, je možno odpovídajícím způsobem zvětšit napětí, které ji zatěžuje, aniž by se zvětšil součinitel intenzity napětí.

K prasknutí výrobku dojde, překročí-li součinitel intenzity napětí  $K_I$  určitou kritickou hodnotu označovanou  $K_{IC}$ . Podmínka  $K_I < K_{IC}$  je nejčastěji používaným kritériem stability trhliny: je-li toto kritérium splněno, trhliny existující v materiálu nerostou. Veličina  $K_{IC}$  — kritický součinitel intenzity napětí (cri-

tical stress intensity factor) je materiálová konstanta a nazývá se též lomová houževnatost (fracture toughness). Na základě znalostí  $K_{IC}$  je možné vypočítat kritické napětí  $\sigma_K$ , při němž materiál praskne. Hodnoty  $K_{IC}$  se pro různé druhy skla pohybují v rozmezí  $0,6 \div 1,1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$  [13, 14, 46].

Podrobnější přehled nejdůležitějších poznatků o pevnosti skla z hlediska lomové mechaniky jsme podali v předcházejícím článku [45].

Obecně lze tedy závislost kritického napětí na rozměru vady (hloubce trhliny) vyjádřit rovnicí

$$\sigma_K = \frac{K_{IC}}{Y a^{0,5}}. \quad (5)$$

Pro dané složení skla a prostředí je  $K_{IC}$  konstantní, takže vztah lze přepsat na výraz udávající závislost kritického napětí na rozměrech vady (trhliny) za jinak konstantních podmínek — stejném složení skla, prostředí, stejném tvaru a umístění trhliny a stejném tvaru skleněného předmětu:

$$\sigma_K = k \times a^{-0,5}, \quad (6)$$

kde  $k$  — faktor, závislejší na tvaru a poloze trhliny, druhu a rozměru skla a okolním prostředí.

#### NAMĚŘENÉ HODNOTY SNÍŽENÍ PEVNOSTI SKLÁŘSKÝCH VÝROBKŮ PO POŠKOZENÍ JEJICH POVRCHU

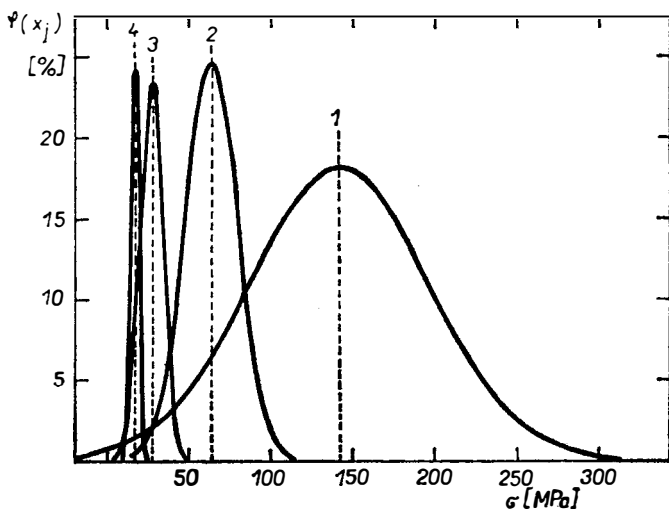
Jak již bylo uvedeno v předcházejícím textu, pevnost skla se poškozením povrchů prudce snižuje. K poškození může dojít mechanickou cestou nebo vlivem zvýšené teploty.

Běžnější a více známý je vliv mechanického poškození — poškrábání. Jako příklad lze uvést měření provedená [17] na nepoškozených tyčinkách, majících vysokou počáteční pevnost 2 000 MPa: již dotykem s papírem poklesla jejich pevnost o 20 až 40 % — na 1 200 až 1 600 MPa, vzájemným intenzivním třením tyčinek se snížila o 93 až 95 % — na 100 až 150 MPa, tj. na hodnoty dosahované u běžných výrobků. Hrubým poškozením povrchu, jako je pískování nebo poškrábání výraznými rýhami, poklesne pevnost až na hodnoty kolem 15 MPa.

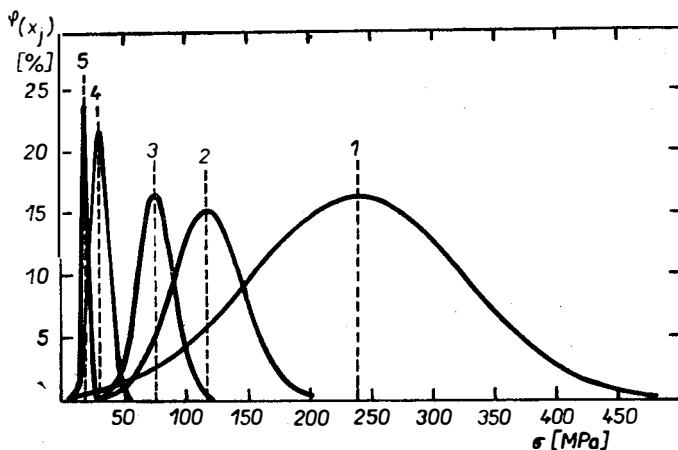
#### Plochá tabulová skla

Zvláštní pozornost byla věnována zkoumání vlivu poškození povrchu na pevnost plochého tabulového skla, dodaného z běžné výroby. U plochého skla taženého systémem Fourcault tloušťek 0,9 až 3,0 mm poklesla po poškrábání brusným papírem s SiC č. 240 (tenké rýhy, viditelné okem) původní pevnost v ohybu o 70 až 80 % — z 90 až 140 MPa na 23 až 40 MPa, pevnost v nárazu se snížila ještě více — o 70 až 90 % [18, 19]. (Snížení pevnosti v nárazu bylo ve všech případech vypočteno z pevnosti v nárazu, vyjádřené energií úderu, resp. výškou volného pádu zkušební kuličky, při nichž vzorek praskl.) Stejným způsobem poškrábaná plavená skla (Float) tloušťky 1,8 mm a 3,9 mm vykazovala obdobné hodnoty — snížení pevnosti v ohybu o 74 až 87 %, pevnosti v nárazu o 82 % [18—20]. Vliv různě intenzivního poškození povrchu na pevnost v ohybu plochého skla Fourcault tloušťky 3,0 mm a plochého skla plaveného (Float) tloušťky 2,8 mm je zobrazen na obr. 3 a 4 pomocí křivek rozdělení relativních

četností vzorků s původním a různě poškrábaným povrchem [18]. Povrch plaveného skla, který byl při výrobě ve styku jen s atmosférou, a je tedy nejméně poškozený, je výrazně pevnější než protilehlý povrch, který byl při výrobě ve styku s cínovou lázní a než povrch skla Fourcault. S rostoucím poškozením povrchu klesla průměrná pevnost plaveného skla až na 15, resp. 8 % původní hod-



Obr. 3. Pevnost v ohybu plochého skla Fourcault tloušťky 3,0 mm s původním a různě poškrábaným povrchem; 1 — původní, nepoškrábaný povrch, 2 — povrch poškrábaný brusným papírem s SiC č. 500, 3 — povrch poškrábaný brusným papírem s SiC č. 240, 4 — povrch poškrábaný brusným papírem s SiC č. 36,  $\sigma$  — pevnost v ohybu,  $\varphi(x_j)$  — relativní četnost.



Obr. 4. Pevnost v ohybu plochého skla plaveného (Float) tloušťky 2,8 mm s původním a různě poškrábaným povrchem; 1 — původní, nepoškrábaný povrch, který byl při výrobě ve styku s atmosférou, 2 — původní, nepoškrábaný povrch, který byl při výrobě ve styku s cínovou lázní, 3 — povrch poškrábaný brusným papírem s SiC č. 500, 4 — povrch poškrábaný brusným papírem s SiC č. 240, 5 — povrch poškrábaný brusným papírem s SiC č. 36,  $\sigma$  — pevnost v ohybu,  $\varphi(x_j)$  — relativní četnost.

noty, skla Fourcault až na 12 % původní hodnoty. Z grafů na obr. 3 a 4 je názorně vidět jednak velký rozptyl hodnot pevnosti jednotlivých vzorků, zvláště výchozích, nepoškrábaných vzorků s velkou průměrnou pevností, jednak pokles rozptylu pevnosti s rostoucím poškozením vzorků.

### Tyčinky

Na tyčinkách z pěti typických hromadně vyráběných skel ( $\alpha_{20-300}^{\circ\text{C}} = 3,2 \times 10^{-6}$  až  $8,9 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ\text{C}}^{-1}$ ) bylo zjištěno, že poškrábáním povrchu brusným papírem s SiC č. 240 poklesne jejich pevnost v ohybu i dynamická pevnost v nárazu v průměru o 66, resp. 65 %. Zabránil-li se naopak vzájemnému poškození tyčinek tím, že ihned po vytažení byly proloženy papírem, stoupne jejich pevnost o 61 % [21].

### Protisluneční, ochranná a brýlová skla

Pevnost v nárazu protislunečních, ochranných a dioptrických skel po poškrábání brusným papírem s SiC č. 240 poklesla v průměru na 57 % hodnoty, byl-li poškrábán vypouklý povrch vzorků s původním povrchem, na nějž byl prováděn náraz. Po poškrábání vydutého povrchu, namáhaného při nárazu tahem, poklesla pevnost ještě více, na 12, resp. 14 % původní hodnoty [22].

### Trubky

Při poškrábání vnějšího, resp. vnitřního povrchu strojně tažených trubek ze skla Simax ve směru kolmém na osu, tj. kolmém na působící napětí, poklesne jejich pevnost v ohybu o 30, resp. 40 % [23]. Při poškrábání ve směru osy trubky, to je, ve směru působícího tahového napětí, se pevnost v ohybu ve shodě s teoretickým předpokladem prakticky nezmění. Malý pokles pevnosti vlivem poškrábání vzhledem k pevnosti obdobně poškrábaných tyčinek ze Simaxu, kde pevnost klesla o 2/3 [21], resp. plochých skel, kde klesla o 3/4 až 7/8 [18, 20], lze vysvětlit tak, že pravděpodobně již původní nepoškrábané strojně tažené trubky mají povrch poškozený z výroby, i když to pouhým okem nelze postřehnout. Tento názor podporuje i poměrně nízká hodnota pevnosti v ohybu strojně tažených trubek ze Simaxu — kolem 50 MPa — ve srovnání s pevností tyčinek, tažených ze Simaxu na laboratorních zařízeních — 200 MPa [21] a taženého plochého skla — 100 až 140 MPa.

### Vrstvená plochá skla

Měření byla prováděna [44] na vzorcích plošného rozměru  $100 \times 100$  mm, zhotovených ze 2 stejně tlustých plochých tabulových skel Fourcault, svrstvených polyvinylbutyralovou fólií tloušťky 0,4 mm. Tloušťky skla byly 0,9 mm, 1,1 mm a 1,3 mm.

Poškrábáním povrchu brusným papírem s SiC č. 240 poklesla pevnost v ohybu v průměru o 55 až 65 %, pevnost v nárazu o 59 až 78 %.

## Tvrzená skla

K snížení pevnosti poškrábáním povrchu dochází rovněž u výrobků zpevněných tvrzením. Např. tvrzená plochá skla Float tloušťky 3,9 mm ztratila po poškrábání brusným papírem (s SiC č. 240) 56 % původní pevnosti v ohybu a 91 % původní pevnosti v nárazu. Značný pokles pevnosti v ohybu, resp. v nárazu, byl pozorován již po styku povrchu s válečkovým dopravníkem v průběhu dopravy skel po vytvrzení — o 28 %, resp. 41 %. Nepříznivý vliv poškození povrchu se neodstraní ani vytvrzením; u skel poškrábaných před tvrzením pevnost v ohybu, resp. v nárazu poklesla o 29 %, resp. 77 %. U skel poškrábaných po tvrzení byl tento pokles ještě výraznější, jak bylo uvedeno již výše — u pevnosti v ohybu o 56 %, u pevnosti v nárazu až o 91 %. I při poškrábání po vytvrzení je však výsledná pevnost v ohybu, resp. v nárazu stejná, resp. mírně vyšší než u výchozích nepoškrábaných netvrzených skel a 5×, resp. 10× vyšší, než u obdobně poškrábaných netvrzených skel [24].

## Skla zpevněná iontovou výměnou

Při zpevnění skla iontovou výměnou se vytváří na jeho povrchu tlaková vrstvička tloušťky řádově v jednotkách až desítkách, jen výjimečně stovkách mikronů. Pokud není tato vrstvička dostatečně tlustá, dojde při poškození povrchu k úplné ztrátě zpevnění a k poklesu pevnosti až na nízkou hodnotu, příslušející neztvrzenému sklu s poškozeným povrchem. Pro zachování zvýšené pevnosti při běžné manipulaci se skleněnými výrobky je třeba, aby tlaková povrchová vrstvička měla tloušťku minimálně 10  $\mu\text{m}$ , nejlépe alespoň 15 až 18  $\mu\text{m}$  [29, 30]. Po poškrábání skla rýhami viditelnými pouhým okem poklesla pevnost v ohybu zpevněných skel s vrstvičkou uvedené tloušťky v průměru o 50 %, pevnost v nárazu o 70 %. Přesto však ve srovnání s nezpevněnými vzorky s obdobně poškozeným povrchem byla výsledná pevnost poškrábaných zpevněných skel v ohybu i v nárazu 8× až 11× vyšší. Po poškrábání hrubozrnným brusným papírem s SiC č. 120 poklesla pevnost v ohybu zpevněných skel na 1/4; přesto je asi o 60 % vyšší než u nezpevněného nepoškrázaného skla a 8× vyšší než u obdobně poškrábaného nezpevněného skla [29].

## Zpevněná vrstvená plochá skla

Měření byla, obdobně jako u nezpevněných vrstvených plochých skel, prováděna [44] na vzorcích plošného rozměru 100×100 mm, zhotovených ze dvou stejně tlustých plochých tabulových skel, zpevněných výměnou iontů v roztaženém  $\text{KNO}_3$ . Skla byla svrstvena polyvinylbutyralovou fólií tloušťky 0,4 mm. Tloušťky skla byly 0,9 mm, 1,1 mm a 1,3 mm. Poškrábáním povrchu brusným papírem s SiC č. 240 poklesla pevnost v ohybu v průměru o 38 až 49 %, pevnost v nárazu o 31 až 68 %.

## Závislost pevnosti na hloubce poškrábání

Poškrábané sklo praská šířením trhliny, vybihající z rýhy (vrypu), vytvořené poškrábáním. Mezi hloubkou trhliny, vzniklé poškrábáním povrchu plochého skla a jeho pevností v ohybu byl na základě experimentálních dat odvozen [24] vztah

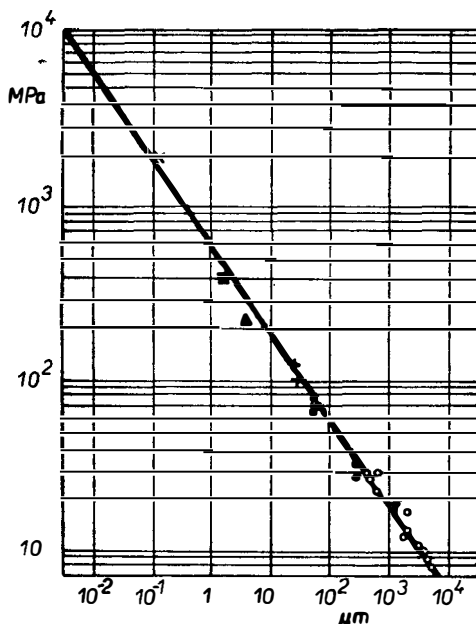
$$\sigma_K = 550 a^{-0,5} \quad (7)$$

resp.

$$a = 3,0 \cdot 10^6 \sigma_K^{-2}, \quad (8)$$

kde  $\sigma_K$  — pevnost v ohybu v MPa, $a$  — hloubka trhliny, z níž praskání, v  $\mu\text{m}$ .

Vztah (7) a (8) je znázorněn na obr. 5 spolu s experimentálně stanovenými hodnotami.



Obr. 5. Závislost pevnosti v ohybu plochého skla na hloubce počáteční povrchové trhliny: ● — měření autorů [24], × — měření J. Gordona aj. [40], ○ — měření E. Shanda [41], ■ — hodnoty předpokládané A. Griffithem [16, 42], ▲ — hodnoty předpokládané E. Poncetem [16, 42], + — měření J. Mecholského [43], přímka — závislost (7) resp. (8).

Porovnáme-li rovnice (7) resp. (8), odvozené z experimentálních výsledků, s obecnou rovnicí (5) vidíme, že jsou totožné pro  $Y = \pi^{0,5}$  (hodnota  $Y$  pro trhlinu ve středu tenké nekonečné desky, zatížené tahovým napětím kolmým k rovině trhliny) a  $K_{IC} = 0,72 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$ . Takto vypočtená hodnota  $K_{IC}$  je shodná (str. 583 v [46]), resp. velmi blízká [50] hodnotě naměřené u sodnovápenatokrémiditého skla jinými autory.

Trhlinka, z níž začíná praskání, je cca  $10 \times$  až  $20 \times$  hlubší než povrchová rýha (vryp) vytvořená poškrábáním, z níž trhlinka vyběhává. Pro závislost mezi pevností plochého skla v ohybu a hloubkou rýhy, vytvořené poškrábáním, byl navržen [24] vztah

$$\sigma_K \doteq 130 h^{-0,5}, \quad (9)$$

resp.

$$h = 1,6 \cdot 10^4 \sigma_K^{-2}. \quad (10)$$

kde  $h$  = maximální hloubka rýhy (vrypu) v  $\mu\text{m}$ , $\sigma_K$  = pevnost v ohybu v MPa.



Ze vztahu (8) a (10) byla vypočtena maximální hloubka rýhy a počáteční trhliny původních nepoškrábaných plochých skel tak, jak byly dodány z výrobního závodu — viz tabulka I.

Tabulka I

Maximální hloubka rýhy a počáteční trhliny nepoškrábaných plochých skel, dodaných z výrobního závodu, vypočtená z jejich pevnosti pomocí vztahu (8) a (10)

Typ skla	Povrch, který byl při výrobě	Max. hloubka rýhy ( $\mu\text{m}$ )	Hloubka počáteční trhliny ( $\mu\text{m}$ )
Plavené sklo (FLOAT)	ve styku s atmosférou	0,3	5
	ve styku s Sn lázní	1,2	22
Sklo Fourcault	—	0,8	15

Vypočtené hodnoty jsou v dobré shodě s předpoklady Griffitha a dalších [5, 8] o hloubce trhlínek v původním skle i s publikovanými údaji o maximální hloubce vrypů (nerovností) jednotlivých typů skel: optická skla  $0,03 \div 0,1 \mu\text{m}$  (26, 27), sklo leštěné ohněm  $0,2 \mu\text{m}$ , jemně obroušený povrch  $2 \mu\text{m}$  (str. 120 a 103 [28]).

#### Vliv okolí, stárnutí a únava

Pevnost skla s poškozeným povrchem závisí, kromě intenzity poškození, též na okolním prostředí, na době, která uplynula od poškození — na tzv. stárnutí a na době i rychlosti zvyšování namáhání vyvolávajících tzv. únavu.

Nejvýznamnější případy vlivu okolí na pevnost: Je-li namáhané sklo obklopeno vzduchem, jeho pevnost obecně klesá s rostoucí vlhkostí vzduchu. Při ponoření do většiny organických kapalin pevnost stoupne o 10 % proti namáhání ve vzduchu s obvyklou vlhkostí, po ponoření do vody naopak nejprve o 10 % poklesne. Již po krátkodobém pobytu ve vodě však pevnost poškozených skel stoupá nad hodnoty naměřené na vzduchu [31, 25].

Stárnutím, tj. s rostoucí dobou od poškození, po kterou nebylo sklo mechanicky namáháno, pevnost poškrábaného skla roste, přičemž rychlost zvyšování pevnosti je tím větší, čím je závažnější poškrábání a čím vlhčí je vzduch; největší je ve vodě. Např. po jednom dnu ve vodě stoupne pevnost opískovaného povrchu o 30 %, pevnost povrchu poškrábaného smirkovým plátnem o 60 % [33].

Od stárnutí, kdy sklo není mechanicky namáháno, je třeba odlišit únavu skla. Jestliže na sklo působí určitou dobu namáhání konstantní velikosti, mluvíme o statické únavě. Vyjadřuje se buď únavovou křivkou, tj. závislostí mezi dobou, za niž dojde k prasknutí a příslušným namáháním, nebo indexem odolnosti proti statické únavě [45]. Čím je větší působící napětí, tím je kratší doba, za niž dojde k prasknutí. Tato doba závisí však též na okolním prostředí a složení skla. Dynamická únava se projevuje při zvyšování zatěžování v průběhu namáhání. Čím je rychlost zatěžování větší, tím je větší i výsledná pevnost skla. Podrobnější údaje o únavě skla jsou např. v předcházejícím článku [45].

Vliv okolí a stárnutí jsou vysvětlovány působením prostředí na rychlost růstu a tvar trhlinek, na nichž závisí výsledná pevnost. Čím víc obsahuje prostředí vodních par, tím větší je rychlost růstu trhlin při zatěžování (viz např. [45]), a proto tím nižší je pevnost. V organických prostředích, kde nedochází k reakci okolí s povrchem trhlin, je rychlost jejich růstu nižší než v případě prostředí s vodními parami, proto je pevnost skla vyšší.

Při stárnutí, tj. s rostoucí dobou po poškození, po níž sklo není mechanicky namáháno, dochází následkem chemické reakce povrchu trhlin s vodními parami, resp. vodou v okolí k zvětšení poloměru zakřivení trhlin — jejich otupení — a následkem toho výsledná pevnost vzroste [viz vztah (1)].

Statická i dynamická únava je vyvolána podkritickým růstem trhlin (bližší např. [45]).

### Poškození povrchu vyhřátím

K poškození povrchu a následkem toho k poklesu pevnosti dochází dále při vyhřátí skla s neporušeným povrchem na teploty nad 50 až 100 °C [34–36]. Pevnost nepoškozených tyčinek poklesla z 2 000 MPa na 400 MPa po vyhřátí 30 minut na 630 °C a na 200 MPa po vyhřátí 2 minuty na 850 °C [37]. Pevnost nepoškozených vláken o výchozí pevnosti 3 000 MPa klesá s rostoucí teplotou vyhřátí až na 500 MPa pro 700 °C [38]. Poškození povrchu při zvýšených teplotách — od transformačního intervalu výše — je připisováno počínajícímu odsklennění, při teplotách pod transformačním intervalem skla se vysvětluje přilnutím jemných prachových částic z atmosféry k povrchu skla [39].

U skel, která mají pevnost sníženou běžnou manipulací na hodnoty obvyklé u komerčních výrobků, nedochází k poklesu pevnosti vlivem zvýšené teploty [38]. U vzorků, které jsou poškrábané, naopak při delší výdrži při zvýšených teplotách dochází k zvýšení pevnosti vlivem zaoblení, resp. až zatavení trhlinek. Proto též přechlazením poškrábaných výrobků se jejich pevnost zvýší, a to přibližně na hodnotu, na níž by vzrostla stárnutím [33, 46].

### Literatura

- [1] Rawson H.: *Properties and applications of glass*. Elsevier, Amsterdam — Oxford — N. Y. 1980.
- [2] Uhlmann D. R., Kreidl N. J.: *Glass: Science and technology, Vol. 5. Elasticity and strength in glasses*. Academic press, N. Y. 1980.
- [3] Pye L. D., Stevens H. J., La Course W. C.: *Introduction to glass science*. Plenum press, N. Y. — London 1972.
- [4] Inglis C. E.: *Trans. Inst. Nav. Archit.* 55, 219 (1913).
- [5] Griffith A. A.: *Phil. Trans. Royal. Soc. A* 221, 163 (1920).
- [6] Cottrell A. H.: *The mechanical properties of matter*. Wiley, N. Y., 1964.
- [7] Orowan E.: *Weld. J.* 34, 157 (1955).
- [8] Kelly A.: *Strong solids*, 2. vyd. Clarendon Press, Oxford 1973.
- [9] Hillig W. B. in: *Symposium sur la résistance mécanique du verre*, str. 245. Union scientifique continentale du verre, Charleroi 1962.
- [10] Cornelissen J. et al. in: *Advances in glass technology*, str. 489. Plenum Press, N. Y. 1962.
- [11] Mecholsky J. J., Rice R. W., Freiman S. W.: *J. Mat. Sci* 11, 1310 (1976).
- [12] Mecholsky J. J., Rice R. W., Freiman S. W.: *J. Amer. Cer. Soc.* 57, 440 (1974).
- [13] Chermant J. L., Ostertock F., Vadam E.: *Verres et Réfract.* 33, 843 (1979).
- [14] Wiederhorn S. M.: *Fracture mechanics of glass*. Vol. 2. Plenum Press, N. Y. 1974.
- [15] Höschl C.: *Principy a zákony mechaniky poddajných těles*. 2. část. Dům techniky ČSVTS, Praha 1979.
- [16] Liebowitz H.: *Fracture*, Vol. 3. Academic Press, N. Y. 1971.